



## Energía renovable a partir de los lodos de depuradoras urbanas

**Autor:** Elena Roche

**Institución:** Universidad Politécnica de Madrid

**Otros autores:** Juan Manuel de Andrés Almeida(Universidad Politécnica de Madrid);Gustavo Adolfo Narros Sierra(Universidad Politécnica de Madrid); M<sup>a</sup> Encarnación Rodríguez Hurtado (Universidad Politécnica de Madrid)

## Resumen

El lodo de depuradora es el residuo líquido o semilíquido procedente de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs) del que puede obtenerse una energía renovable empleando la tecnología de la gasificación. Esta tecnología consiste en la oxidación parcial del sustrato carbonoso del lodo a altas temperaturas bajo condiciones subestequiométricas de aire, oxígeno u otros agentes gasificantes. Los productos obtenidos mediante gasificación son: un gas de síntesis (SYNGAS, con composición variable de H<sub>2</sub>, CO) un residuo carbonizado (char) y una fracción líquida de compuestos orgánicos de distinto peso molecular denominados alquitranes. El gas de síntesis tiene aplicaciones como son la generación de energía eléctrica/térmica o la síntesis de compuestos químicos. Sin embargo, la presencia de alquitranes imposibilita su uso en buena parte de las aplicaciones. El trabajo realizado que aquí se presenta estudia la posibilidad de tratar los lodos de depuradora mediante gasificación. Para ello, se han realizado las siguientes tareas: - Caracterización del lodo incluyendo la determinación de su humedad, materia orgánica, análisis elemental (C, N, H, S) y contenido de metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg y Cr). - Estudios de termogravimetría (TGA) del lodo para conocer su comportamiento térmico y la temperatura a la que se producen las principales reacciones en la gasificación. - Gasificación en un equipo de lecho fluido burbujeante y alimentación en continuo a escala de laboratorio. Con dicho gasificador se ha experimentado a distintas temperaturas y cargas para conocer las condiciones de proceso más favorables para aumentar la producción y el poder calorífico del SYNGAS obteniendo, a la vez, una baja producción en alquitranes. Para ello se ha analizado la composición de los gases obtenidos, la producción de alquitranes, la conversión del carbón y la eficiencia en la gasificación. Los alquitranes fueron analizados mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas, para conocer y cuantificar sus diferentes componentes. - Determinación de la capacidad adsorbente de carbones activos producidos mediante gasificación, utilizando azul de metileno como adsorbato. Las conclusiones obtenidas permiten considerar la viabilidad técnica de la gasificación de lodos como fuente de energía renovable.

**Palabras claves:** lodos; gasificación; gas de síntesis; alquitranes

## 1. INTRODUCCION

Actualmente, a la creciente demanda energética se une la preocupación por la gestión de los residuos producidos. En este contexto, la legislación en materia de residuos favorece la aplicación de tecnologías que permiten la revalorización de los mismos, para disminuir su impacto ambiental y fomentar su aprovechamiento energético. Dentro de este enfoque están los lodos producidos en las estaciones de depuración de aguas residuales urbanas (EDAR) (MARM, 2009; CAM, 2006)

Los lodos de depuradora son una mezcla compleja de materiales orgánicos e inorgánicos. De estos compuestos, una parte es materia orgánica natural que incluye fósforo, nitrógeno, potasio y otra parte está constituida por metales, compuestos orgánicos sintéticos y microorganismos patógenos. Por tanto, la gestión de los lodos se debe realizar adecuadamente para evitar la contaminación de aire, suelo y agua. Uno de los usos tradicionales de los lodos ha sido el uso agrícola, que exige un bajo contenido en metales, un buen contenido en nutrientes (fósforo, nitrógeno y potasio) y un bajo nivel de compuestos orgánicos sintéticos. Otras vías de gestión de los lodos son la eliminación en vertederos y los tratamientos de valorización energética como la incineración. Dentro de la valorización energética, también se incluye la gasificación (Nipattummakul et al, 2010; Chen et al, 2011, Xie, et al, 2010; Chun, et al, 2012).

La gasificación es un proceso termoquímico en el que el contenido carbonáceo del material es convertido en gas, cenizas y alquitranes en una atmósfera reductora. El gas obtenido está formado por una mezcla de gases (CO, CO<sub>2</sub>; H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e hidrocarburos de bajo peso molecular) que pueden ser utilizados, tanto para generación de energía térmica y eléctrica como, para la síntesis de compuestos químicos. Además de gases, en los procesos de gasificación se producen alquitranes, que son productos problemáticos ya que dificultan la utilización del gas al ocasionar problemas de erosión, corrosión, y obstrucción en distintas partes del sistema (Manara and Zabaniotou, 2012).

La concentración y composición de los alquitranes viene determinada por la materia prima utilizada y las condiciones de la gasificación, fundamentalmente, del agente gasificante, tipo de gasificador y temperatura. Los alquitranes son una fracción compleja formada por un gran número de compuestos de diferente peso molecular y composición. La Norma CEN/TS 15439:2006 los define como los compuestos orgánicos presentes en un gas excluyendo los hidrocarburos gaseosos más ligeros (C1 a C6). La mayoría de los componentes de los alquitranes son sustancias aromáticas, parafinas con enlaces conjugados y olefinas (Qin et al., 2010). Los análisis de alquitranes presentes en la bibliografía dan como compuestos mayoritarios sustancias simples como fenol, piridina y tolueno, mientras que los denominados hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) más complejos están presentes, de forma más significativa, cuando se trabaja a mayor temperatura (Li & Suzuki, 2009; Michel et al., 2011). Esta heterogeneidad, sin embargo, lo hace un producto atractivo para ser utilizado como materia prima en la síntesis de compuestos, combustible directo y para la obtención de aceites ligeros y gas mediante craqueado térmico con catalizador( Li & Suzuki, 2010).

Finalmente, el tercer producto principal obtenido de la gasificación es el residuo carbonoso (char), formado fundamentalmente por cenizas y el residuo carbonoso sin reaccionar. Este producto también puede tener aprovechamiento como material adsorbente (Mendez et al, 2005) y como reactivo en la gasificación (Nilsson et al., 2012).

En este trabajo se ha realizado una caracterización del lodo para determinar su humedad, materia orgánica, composición elemental y contenido en metales pesados. Se completaron los ensayos físico-químicos con los correspondientes termogravimétricos, que consisten en el registro de la pérdida de peso que se produce en la muestra al incrementar la temperatura y, de esta forma, conocer la facilidad con la que el material se degrada (Calvo et al., 2004). Estos estudios permitieron obtener información sobre su composición, los procesos que tienen lugar durante su descomposición térmica y los valores de las constantes cinéticas de las reacciones que se producen.

Los ensayos de gasificación con el lodo se hicieron en un gasificador de laboratorio de lecho fluido burbujeante. Específicamente, se estudió la influencia de la temperatura y de la carga de alimentación en los productos de gasificación (gas, alquitranes y cenizas).

La fracción de alquitranes condensables volátiles se analizó por cromatografía gaseosa y espectrofotometría de masas. Esta técnica permite identificar y cuantificar los compuestos presentes producidos en los ensayos (Neubauer, 2011).

Finalmente, se han realizado ensayos para comprobar la capacidad adsorbente del *char* utilizando como adsorbato una solución de azul de metileno. Los resultados se han comparado con dos tipos de carbones activos comerciales y con lodo sin activar.

## 2. MATERIALES Y METODOLOGIA

### 2.1 Materias primas

Se ha trabajado con muestras de lodo seco en forma de agregados esféricos de unos 2-5 mm de diámetro. En la Tabla 1 se recogen los datos de los ensayos de caracterización del mismo.

**Tabla 1: Análisis de caracterización del lodo**

Parámetro	Método Analítico		
Humedad (%)	7.9	UNE-EN 12880-2001	
Materia orgánica (%)	55.4	UNE-EN 12879-2001	
Cenizas (%)	44.6	UNE-EN 12879-2001	
Carbono Total (%)	30.7	Elementary micro analyser	
Nitrógeno (%)	4.3		
Hidrógeno (%)	5.0		
Azufre (%)	1.6	LECO CHNS-932	
Oxígeno)	Por diferencia	13.8	
Metales pesados (mg/kg)	Cd	3,0	
	Cu	382,2	
	Ni	70,0	UNE-EN 13346-2001
	Pb	109,6	
	Zn	1926,2	
	Cr	117,3	

Para la realización de los ensayos de gasificación, las muestras de lodo se molturaron y cribaron hasta un tamaño de partícula entre 300 y 500 micras.

## 2.2 Ensayos de termogravimetría

Los ensayos termogravimétricos se han realizado en una termobalanza TA Instruments (TGA 2050 CE). Las condiciones de ensayo han sido las siguientes:

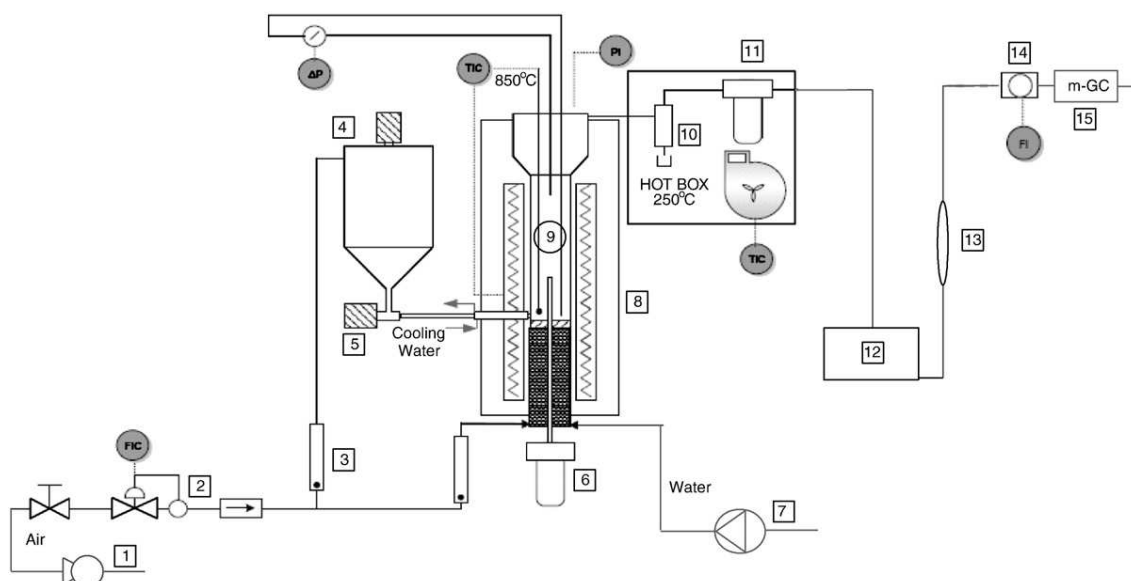
- Temperatura máxima: 900 °C
- Flujo de gases: 150 mL/min
- Velocidad de calentamiento: 10 °C/min
- Masa de lodo: 10 mg
- Gas de entrada: Nitrógeno

## 2.3 Planta de gasificación a escala de laboratorio

Para los ensayos de gasificación se ha utilizado un gasificador de lecho fluido burbujeante cuyo esquema se muestra en la Figura 1. El reactor es de acero inoxidable y el material del lecho es arena de sílice. La alimentación se realiza a través de un sistema de dosificación que consta de una tolva donde se introduce el lodo, un tornillo dosificador (situado en la propia tolva) y un tornillo lanzadera que introduce el lodo en el reactor.

El agente gasificante (aire) era calentado en un precalentador externo a una temperatura de 450 °C. Su caudal era controlado por un caudalímetro de flujo másico. El reactor se calentaba mediante un horno eléctrico. Las partículas que eran arrastradas con los gases se recogían en un ciclón y un filtro micrónico situados en una caja caliente a 250 °C, para impedir la condensaciones de los alquitranes.

El gas que salía del ciclón pasaba a través de un conjunto de 5 condensadores que contenían isopropanol sumergidos en un baño con hielo. Esto permitía la recogida de la mayoría de los alquitranes y el agua.



**Figura 1. Esquema de la planta de gasificación: 1. compresor; 2. controlador de caudal másico, 3. rotámetro; 4. tolva; 5. tornillo de alimentación; 6. depósito de carga; 7. bomba peristáltica; 8. horno; 9. reactor; 10. ciclón; 11. filtro caliente; 12. tren de condensación; 13. filtros de agua, gel de sílice y algodón; 14. medidor de flujo másico; 15. cromatógrafo de gases.**

La cantidad de gases producidos se determinó mediante un medidor de flujo másico y la composición de los gases se analizó en intervalos de 5 minutos con un cromatógrafo de gases Micro-CG, Varian CP-4900. La duración de cada ensayo era de 60 minutos.

La producción de alquitranes se determinó por gravimetría y por cromatografía de gases y espectrometría de masas (GC/MS), siguiendo el protocolo de alquitranes (CEN/TS 15439:2006).

En la Tabla 2 se relacionan los 25 compuestos seleccionados para el análisis cuantitativo por GC/MS. La selección de estos compuestos se realizó en función de determinaciones previas y de bibliografía consultada (CEN/TS 15439:2006, Milne et al., 1999, Adegroye et al., 2004, Phuphuakrat et al., 2010, Michel et al. 2010, Han & Kim, 2008, Šulc et al., 2012).

**Tabla 2: Compuestos utilizados como patrones**

Nombre	Fórmula	PM
PIRROL	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	67
BENCENO	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78
PIRIDINA	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	79
TOLUENO	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	92
FENOL	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	94
BENZONITRILO	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CN	103
ESTIRENO	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH=CH <sub>2</sub>	104
INDENO	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub>	116
INDOL	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N	117
NAFTALENO	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128
QUINOLINA	C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> N	129
ACENAFTILENO	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	156
BIFENILO	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	154
ACENAFTENO	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154
FLUORENE	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	166
CARBAZOL	C <sub>12</sub> H <sub>9</sub> N	197
DIBENZOFURANO	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> O	168
FENANTRENO	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	168
ANTRACENO	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178
FLUORANTENO	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202
PIRENO	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202
CRISENO	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228
BENZO[a]ANTRACENO	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228
BENZO[a]PIRENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252
BENZO[k]FLUORANTENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252

#### 2.4. Ensayos de gasificación

Los ensayos de gasificación se hicieron a un ratio equivalente (ER, definido como la relación entre la masa de aire introducida en el reactor y la masa de aire estequiométrico requerido para la combustión del lodo) de 0.3. Se seleccionó este ER al ser un valor adecuado para conseguir una producción relativamente baja de alquitranes y valores razonables de poder calorífico inferior de los gases (De Andrés, 2011). Con este ER se ha estudiado la influencia de la temperatura (750, 800 y 850°C) y la carga de alimentación (cantidad de lodo introducido por hora y metro cuadrado de sección del gasificador) en la producción de gases, *char* y alquitranes. El caudal de alimentación se modificó entre 110 (como valor de referencia) y 215 kg/ h.m<sup>2</sup>. En la Tabla 3 se recogen las condiciones de los ensayos realizados.

**Tabla 3 Condiciones de gasificación en continuo**

Parámetros	Unidades	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
Temperatura	°C	750	800	850	750	800	850
Lodo introducido	g/min	1,2	1,2	1,2	2,5	2,5	2,5
Caudal de alimentación	kg/h·m <sup>2</sup>	110	110	110	215	215	215
Tiempo de residencia del gas	s	7,8	7,5	7,1	3,9	3,7	3,6

## 2.5 Ensayos de adsorción

Los residuos carbonizados para los ensayos de adsorción se obtuvieron de una planta de gasificación en discontinuo a escala de laboratorio. Esta planta consta de un reactor principal de lecho fijo fabricado en cuarzo y forma cilíndrica que se calienta con un horno eléctrico programable en temperatura y velocidad de calentamiento.

Los ensayos de adsorción se han realizado sobre muestras de residuo carbonizado, carbones activos comerciales (CA1 y CA2) y una muestra de lodo.

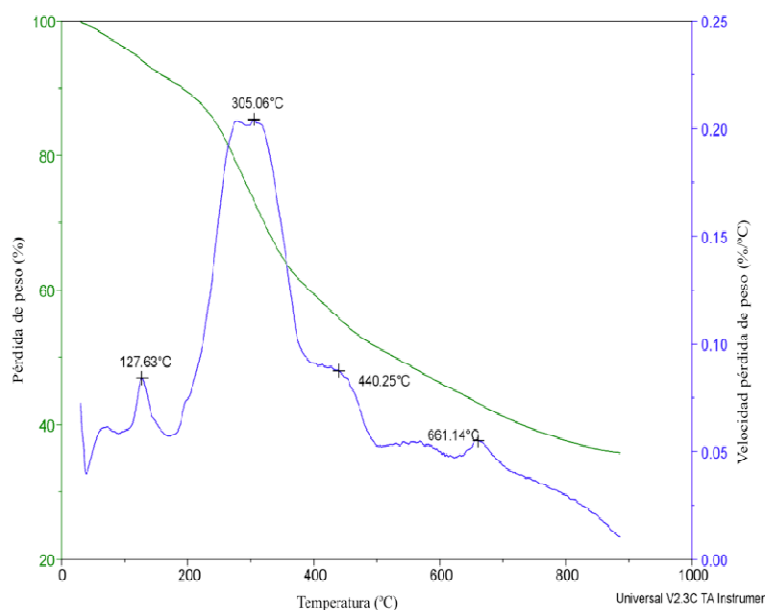
Las muestras mezcladas con la disolución de azul de metileno se agitaron durante 20 horas a una temperatura de 25 °C y posteriormente se procedió a filtrar con papel de filtro. Las concentraciones residuales se analizaron mediante espectrofotometría a una longitud de onda de 660 nm.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSION

### 3.1 Análisis termogravimétrico

En la Figura 2, se muestra la curva de pérdida de peso con la temperatura obtenida a partir de los ensayos termogravimétricos. Concretamente, se muestra la masa presente a cada temperatura y la velocidad de pérdida de masa del lodo. Se observan una serie de picos que coinciden con las principales etapas de mayor pérdida de peso. La primera fase, a temperatura entre 100 y 200 °C, corresponde a la pérdida de humedad del lodo. Durante la segunda fase, entre los 200 y 400 °C, se produce la descomposición de la materia biodegradable, compuestos orgánicos no digeridos, bacterias muertas y compuestos semivolátiles (Calvo et al., 2004). En este rango de temperaturas se degradan celulosa, hemicelulosa y lignina (Shao et al., 2010). En la tercera fase (400 a 600 °C) se oxidan los volátiles liberados y se oxida rápidamente el resto de materia oxidable del lodo. Por último, en la cuarta fase, a temperaturas superiores a los 600 °C, se degrada la fracción inorgánica del lodo y reacciona el *char* con los gases. La curva muestra como a partir de 850 °C no hay pérdida de peso.





**Figura 2. Resultados de los ensayos termogravimétricos.**

### 3.2 Ensayos de gasificación

#### Efecto de la temperatura

Como se puede observar en la Tabla 4, al aumentar la temperatura de gasificación la producción de gases aumenta. Esto se debe a una degradación más intensa del lodo, lo que explica, además, la disminución de la producción de *char*. Temperaturas más elevadas incrementan la concentración de H<sub>2</sub> y CO en los gases producidos y disminuyen la de CO<sub>2</sub>, lo que está asociado a la prevalencia de las reacciones de reformado y de Boudouard. En lo relativo a otros gases producidos, la producción de metano no sufre variaciones significativas con la temperatura y la de los hidrocarburos ligeros (etano y eteno) disminuye. La producción de alquitranes y *char* disminuye al aumentar la temperatura. Así, de 750 a 850 °C, la disminución en la fracción de alquitranes es de un 64,5% y en la de *char* del 63,7 %. El Poder Calorífico Inferior (PCI) de los gases aumenta con la temperatura debido a un mayor contenido de gases combustibles (H<sub>2</sub>, CO, fundamentalmente). La eficiencia en la gasificación (EG, definida como el cociente entre el PCI de los gases producidos y el PCI del lodo introducido) y la conversión del carbón (X<sub>c</sub>, definida como el cociente entre el peso del carbón presente en los gases de gasificación y el peso del carbón introducido en el gasificador) aumentan con la temperatura, lo que coincide con los resultados obtenidos por otros autores (Campoy et al., 2010; Chang et al., 2011).

**Tabla 4 Efecto de la temperatura para un caudal de alimentación de 110 kg/h·m<sup>2</sup>**

Parámetros	Unidades	E_1	E_2	E_3
Temperatura	°C	750	800	850
H <sub>2</sub>	%	9,4	11,9	13,4
N <sub>2</sub>	%	63,2	61,0	58,7
CH <sub>4</sub>	%	3,0	2,8	3,0
CO	%	6,9	7,9	9,28
CO <sub>2</sub>	%	13,4	13,2	12,59
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	%	0,11	0,06	0,03
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	%	1,8	1,8	1,6
Poder Calorífico Inferior del gas	MJ/Nm <sup>3</sup>	3,1	3,4	3,8
Producción de gases	Nm <sup>3</sup> /kg lodo, daf	2,7	2,8	3,0
C <sub>TAR</sub>	g/Nm <sup>3</sup>	7,4	4,1	2,4
Y <sub>tar</sub>	mg/g lodo, daf	20,3	11,8	7,1
Xc	%	66,9	70,6	76,4
EG	%	36,8	42,0	49,4
Char	g/kg daf	58,1	42,3	21,1

C<sub>TAR</sub> :concentración de alquitranes en los gases

Y<sub>TAR</sub> :producción de alquitranes

Xc :conversión del carbono

EG :eficacia en la gasificación

daf (daf: *dry and ash free*); libre de humedad y cenizas

### Efecto del caudal de alimentación

En la Tabla 5 se recogen los resultados de los ensayos de gasificación para las tres temperaturas ensayadas utilizando un caudal de alimentación de 215 kg/h·m<sup>2</sup>. En estos ensayos al aumentar el caudal de alimentación disminuye el tiempo de residencia de los gases en el reactor. El efecto de la temperatura sobre los productos de la gasificación es el mismo que el comentado anteriormente. Sin embargo, comparando los resultados a este caudal respecto al anterior (110 kg/h·m<sup>2</sup>) para cada temperatura, se observa como la producción de H<sub>2</sub> a mayor caudal disminuye (Figura 3a), porque al disminuir el tiempo de residencia de los gases en el gasificador, las reacciones de reformado y craqueo térmico no son tan eficientes (Manyá et al., 2006; Hernández et al., 2010). La diferencia en la producción de alquitranes entre los dos caudales es del orden de un 40%, (Figura 3b). En cuanto a la producción de *char*, los valores son similares pero existe cierta tendencia a obtener mayor cantidad de *char* cuanto mayor es el caudal de alimentación.

**Tabla 5 Efecto de la temperatura para un caudal de alimentación de 215 kg/h.m<sup>2</sup>**

Parámetros	Unidades	E_4	E_5	E_6
Temperatura	°C	750	800	850
H <sub>2</sub>	%	7,6	9,5	11,2
N <sub>2</sub>	%	65,6	63,6	59,9
CH <sub>4</sub>	%	2,7	2,6	3,2
CO	%	6,7	7,5	9,2
CO <sub>2</sub>	%	13,6	13,2	12,5
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	%	0,17	0,07	0,03
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	%	2,0	2,0	1,8
Poder Calorífico Inferior del gases	MJ/Nm <sup>3</sup>	2,7	3,0	3,6
Producción de gases	Nm <sup>3</sup> /kg lodo, daf	2,7	2,8	2,9
C <sub>TAR</sub>	g/Nm <sup>3</sup>	12,2	7,7	4,2
Y <sub>tar</sub>	mg/g lodo, daf	32,4	21,4	12,1
Xc	%	65,0	68,1	75,1
EG	%	31,8	32,7	46,0
Char	g/kg daf	51,5	43,6	30,4

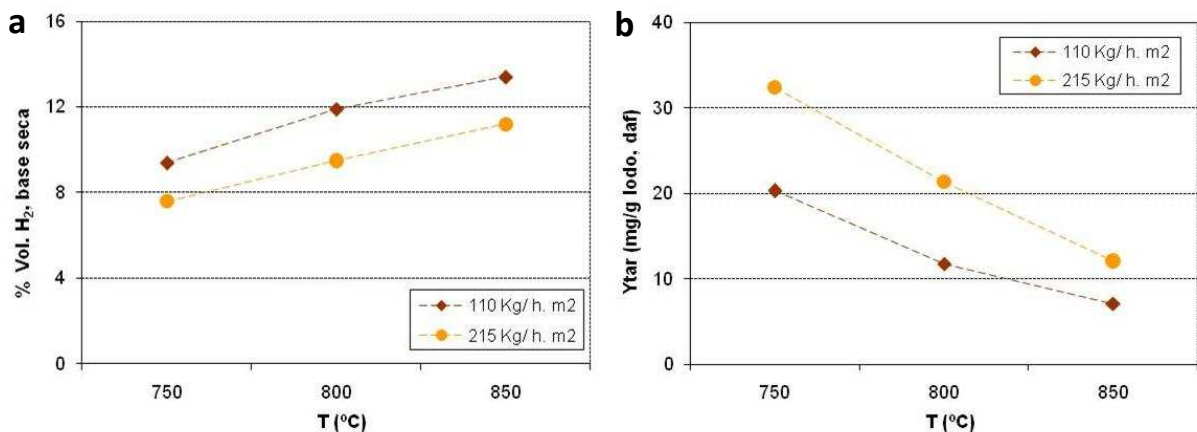
C<sub>TAR</sub> :concentración de alquitranes en los gases

Y<sub>TAR</sub> :producción de alquitranes

Xc :conversión del carbono

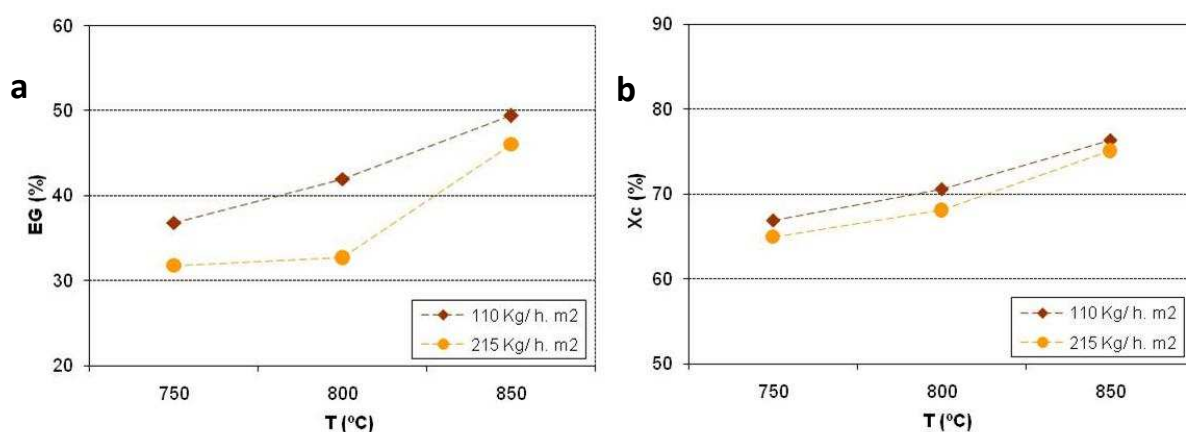
EG :eficiencia en la gasificación

daf (daf: dry and ash free); libre de humedad y cenizas



**Figura 3: Producción de hidrógeno (a) y alquitranes (b) a distintos caudales de alimentación**

En la Figura 4 se representan los valores de eficiencia de la gasificación (EG) y conversión de carbono (Xc) para cada caudal de alimentación y para cada temperatura. Se observa que EG aumenta con la temperatura para ambos caudales pero que los valores obtenidos a caudales de alimentación menores son más elevados, lo que se puede explicar por un ligero aumento de la producción de gases y en su PCI. En cuanto a los valores de Xc, no se han encontrado diferencias notables en función del caudal de alimentación, siendo ligeramente superiores a menores caudales de alimentación.



**Figura 4: Eficacia de la gasificación (a) y conversión del carbón (b) a distintos caudales de alimentación**

### 3.3 Análisis cromatográfico de los alquitranes

En la Tabla 6 se agrupan los compuestos analizados por CG/MS de acuerdo al peso molecular (Li, 2009 y Han, 2008).

**Tabla 6: Clasificación de los compuestos analizados por CG/MS.**

HCs* aromáticos	HCs heterocompuestos	PAH** ligeros	PAH Pesados
Benceno	Piridina	Indeno	Fluoranteno
Tolueno	Pirrol	Naftaleno	Pireno
Estireno	Benzonitrilo	Bifenilo	Benzo[a]pireno
	Fenol	Acenaftileno	Benzo[k]fluoranteno
	Quinolina	Floureno	Criseno
	Indol	Fenantreno	Benzo [a]antraceno
	Dibenzofurano	Antraceno	
	Carbazol		
	Acenafteno		

\*HCs: hidrocarburos,

\*\*PAH: hidrocarburos aromáticos policíclicos.

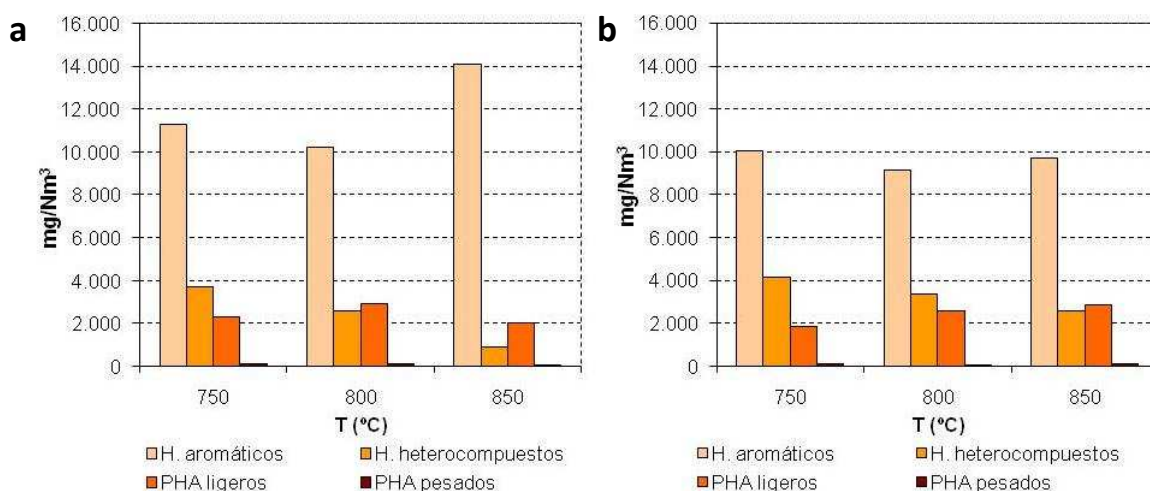
Las concentraciones de las diferentes fracciones de alquitranes están recogidas en la Tabla 7 y en la Figura 5. Se aprecia que la fracción más abundante en todos los ensayos es la que corresponde a los hidrocarburos aromáticos, siendo el benceno el compuesto mayoritario. La presencia de benceno se explica porque forma parte de las reacciones de craqueo y reformado de los alquitranes (Li, et al., 2009 y Morf et al., 2002).

En cuanto a la fracción de hidrocarburos heterocompuestos, se observa para los dos caudales de alimentación una disminución con el aumento de la temperatura, siendo las condiciones del Ensayo-3 las más efectivas para esta disminución. Dentro de la fracción de PAH Ligeros, el compuesto mayoritario presente es el naftaleno y su concentración tiende a aumentar con la temperatura y el caudal de alimentación.

En relación a los PAH pesados, ni la temperatura ni el caudal muestran una influencia significativa en las concentraciones obtenidas. En todos los ensayos, se obtienen niveles muy bajos en comparación con las otras fracciones, esto es positivo porque los PAH pesados tienen gran influencia en el punto de rocío del gas (Campoy et al., 2010).

**Tabla 7: Fracciones alquitranes en los ensayos de gasificación**

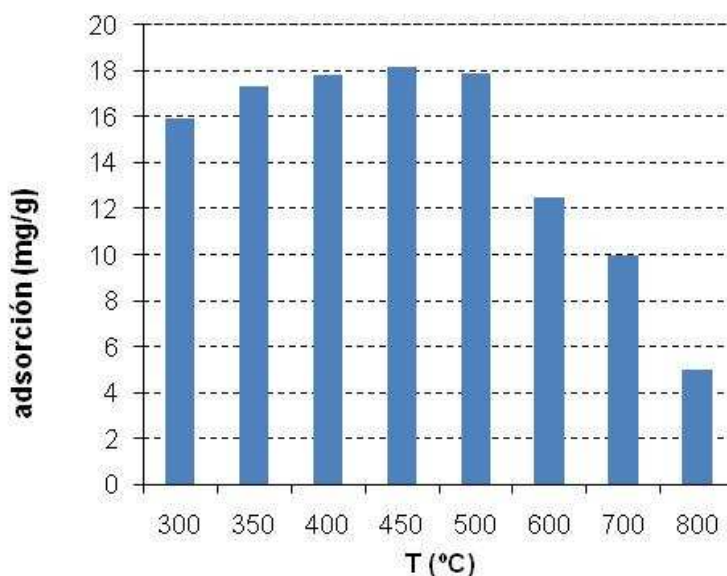
	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6
	<b>mg/Nm<sup>3</sup></b>					
<b>HCs- aromáticos</b>	11285,1	10244,2	14070,3	10065,5	9182,9	9717,6
<b>HCs- heterocompuestos</b>	3681,5	2604,6	902,2	4166,8	3364,6	2614,5
<b>PAH-ligeros</b>	2280,8	2937,7	1996,2	1866,6	2567,0	2887,6
<b>PAH- pesados</b>	98,3	137,8	59,6	106,2	86,3	99,8



**Figura 5: Composición de los alquitranes. Caudal de alimentación de 110 kg/h-m<sup>2</sup> (a); caudal de alimentación de 215 kg/h-m<sup>2</sup>**

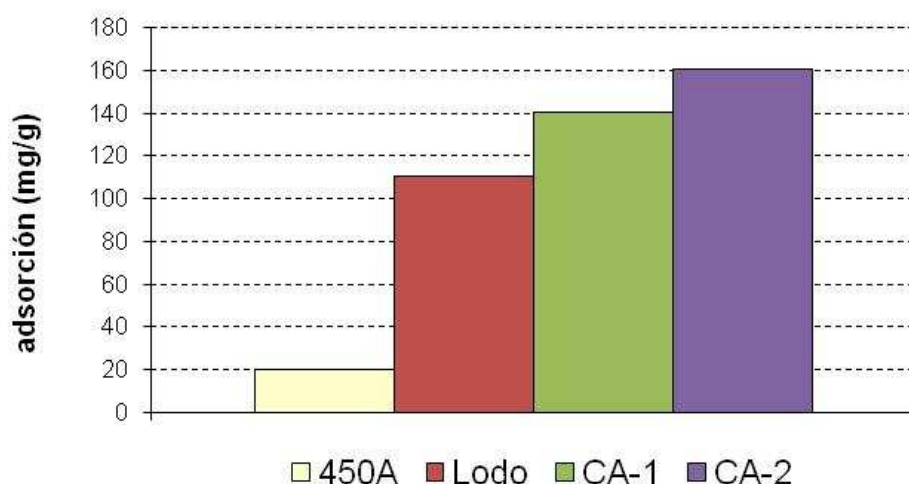
### 3.4 Análisis de adsorción

En la Figura 6 se muestra la capacidad adsorbente de los residuos carbonosos obtenidos en los distintos ensayos de gasificación en discontinuo. La capacidad de adsorción del azul de metileno aumenta con la temperatura de gasificación hasta alcanzar un nivel máximo a 450 °C (18,2 mg/g). Al seguir aumentando la temperatura, la capacidad de adsorción va disminuyendo hasta valores de 5 mg/g a 800°C. Este comportamiento posiblemente se deba a la pérdida de porosidad del residuo. Los resultados coinciden con los obtenidos por Mendez et al., 2005 donde para activar la porosidad de un adsorbente producido a partir de pirolisis de lodo de depuradora se utilizan temperaturas bajas (277°C durante 4 horas).



**Figura 6: Valores de adsorción de azul de metileno para distintas temperaturas**

En la Figura 7 se comparan los resultados de adsorción de un lodo tratado térmicamente (valor máximo, 450°C con aire) con los correspondientes a carbones activos comerciales y lodo sin tratar. La capacidad de adsorción de las distintas sustancias es muy diferente, así, para el residuo de gasificación es 20 mg/g, en el lodo sin tratar térmicamente se alcanzan 110 mg/g y en los carbones activos comerciales 140 mg/g (CA-1) y 160 mg/g (CA-2). Por consiguiente, los lodos tratados térmicamente no tienen las mismas propiedades adsorbentes que los carbones convencionales pero se podrían utilizar en tratamientos no demasiado exigentes de depuración de aguas residuales e industriales.



**Figura 7. Valores de adsorción de azul de metileno de lodos tratados térmicamente con aire a 450 °C (450A), lodo sin tratar (Lodo) y carbones activos comerciales (CA-1 y CA-2)**

#### 4. CONCLUSIONES

- El lodo secado térmicamente se degrada en su totalidad a temperaturas inferiores a 900°C, lo que permite su utilización como materia prima en los tratamientos térmicos de gasificación en lechos fluidos.
- El aumento de temperatura influye claramente en los productos de esta gasificación. Concretamente, mayores temperaturas aumentan la concentración de H<sub>2</sub> y CO y, por tanto, el Poder Calorífico Inferior del gas de síntesis. En cuanto a la producción de alquitranes y de *char*, al aumentar la temperatura disminuyen ambas fracciones, lo que es muy beneficioso para el proceso.
- El aumento del caudal de alimentación disminuye el tiempo de residencia del lodo y de los gases en el reactor y, por tanto, las concentraciones de H<sub>2</sub> y CO en el gas producido son menores. Contrariamente a lo que ocurría con el aumento de la temperatura, las fracciones de alquitranes y *char* aumentan con el caudal de alimentación. Para ambos caudales de alimentación la eficiencia en la gasificación y la conversión del carbono aumentan con la temperatura.
- En relación a la composición de los alquitranes, la fracción más abundante es la que corresponden a los hidrocarburos aromáticos, siendo el benceno el compuesto mayoritario. Las fracciones de hidrocarburos con mayor peso molecular (PAH) no muestran una tendencia significativa a aumentar con la temperatura y el caudal de alimentación.
- La capacidad adsorbente del residuo carbonoso respecto al azul de metileno no es tan elevada como la de los carbones activos convencionales, pero podría ser válida para llevar a cabo tratamientos de eliminación de tintes en aguas residuales que no sean demasiado exigentes,

## 5. BIBLIOGRAFIA

- ADEGOROYE, A., PATERSON, N., LI, X., MORGAN, T., HEROD, A.A., DUGWELL, D.R. and KANDIYOTI, R., 2004. The characterisation of tars produced during the gasification of sewage sludge in a spouted bed reactor. *"Fuel"*, 83, pp. 1949-15.
- CAM, 2006. Plan Regional de Lodos de Depuradora (2006 - 2016), Comunidad Autónoma de Madrid.
- CAMPOY, M. GOMEZ-BAREA, A., FUENTES-CANO, D. Y OLLERO, P, 2010. Tar reduction by primary measures in autothermal air-lown fluidized bed biomass gasifier. *"Industrial & Engineering Chemistry Research"*, (- 49), pp. 1194-11301.
- CALVO, L.; OTERO, M.; JENKINS, B.M GARCÍA, A.I. and MORÁN, A, 2004. Heating process characteristics and kinetics of sewage sludge in different atmospheres, . *Thermochimica Acta*, 409 (2) pp. 127-135.
- CEN/TS 15439:2006. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. and EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION., 2006. *"Biomass gasification: tar and particles in product gases: sampling and analysis."* London: British Standards Institution.
- CHANG, A., CHANG, H., LIN, F., LIN, K. And CHEN, CH., 2011. Biomass gasification for hydrogen production. *"International journal of hydrogen energy"*, 36, pp. 14252-14260.
- CHEN, CH, JIN, Y., YAN, J and CHI Y., 2011. Simulation of municipal solid waste gasification in two different types of fixed bed reactors. *Fuel* (2010), doi:10.1016/j.fuel.2011.06.075
- CHUN, Y, LIM, M., and YOSHIKAWA, K., 2012. Characteristics of product from steam activation of sewage sludge. *"Journal of Industrial and Engineering Chemistry"*, 18, pp.839-847
- DE ANDRES, JM., NARROS, A. and RODRIGUEZ E., 2011. Air-steam gasification of sewage sludge in bubbling bed reactor: Effect of alumina as a primary catalyst. *"Fuel processing Technology"*, 92, pp. 433-440.
- HAN, J. and KIM, H., 2008. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: An overview. *"Renewable and Sustainable Energy Reviews"*, 12(2), pp. 397-416.
- HERNÁNDEZ., J., ARANDA-ALMANSA, G. and BULA., A., 2010. Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time. *"Fuel Processing Technology"*, 91, pp.681-692.
- LI, C. and SUZUKI, K., 2009. Tar property , analysis , reforming mechanism and model for biomass gasification — An overview. *"Renewable and Sustainable Energy Reviews"*, 13(3), pp. 594-604.
- LI, C. and SUZUKI, K., 2010. Resources, properties and utilization tar. *"Resources, Conservation and Recycling"*, 54, pp. 905-915.
- MANARA, P. and ZABANIOTOU, A., 2012. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – a review. *"Renewable and Sustainable Energy Reviews"*, 16, pp. 2566-2582.
- MANYÁ, J., SANCHEZ, J., ABREGO, J., GONZALO, A y ARAUZO, J., 2006. Influence of gas residence time and air ratio on the air gasification dried sewage sludge in a bubbling fluidised bed. *"Fuel"*, 85, pp. 2027-2033.
- MARM, 2009. Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015. *Ministerio de Medio ambiente Rural y Marino.*



- MENDEZ, A., GASCO, G., FREITAS, M., SIEBIELEC, G., STUCZYNSKI, T. and FIGUEIREDO J.L., 2005. Preparation of carbon-based adsorbents from pyrolysis and air activation of sewage sludges. *Chemical Engineering Journal*, 108 (1-2), pp. 169-177.
- MICHEL, R., RAPAGNA, S., BURG, P., DI CELSO, G., COURSON, C., ZIMNY, T. and GRUBER, R., 2011. Steam gasification of Miscanthus X Giganteus with olivine as catalyst production of syngas and analysis of tars (IR, NMR and GC/MS). *Biomass bioenergy*, 35(7), pp. 2650-2658.
- MILNE, T.A., ABATZOGLOU, N., EVANS, R.J., KEMESTRIE, I., 1998. Biomass gasifier "Tars": their nature, formation, and conversion. *National Renewable Energy Laboratory*, Report No NREL/TP-507-25357.
- MORF, P., HASLER, P. and NAUSSBAUMER, T., 2002. Mechanisms and kinetics homogeneous secondary reactions of tar from continuous pyrolysis of wood chips. *Fuel*, 81, pp. 843-853.
- NEUBAUER, Y., 2011. Strategies for tar reduction in fuel-gases and synthesis-gases from biomass gasification. *Journal of Sustainable Energy & Environment Special Issue*, 67, pp. 71.
- NILSSON, S., GOMEZ-BAREA, A. and FUENTES, D., 2012. Gasification reactivity of char from dried sewage sludge in fluidized bed. *Fuel*, 92, pp. 346-353.
- NIPATTUMMAKUL, N., AHMED, I., KERDSUWAN, S. AND GUPTA, A., 2010. High temperature steam gasification of wastewater sludge. *Applied Energy*, 87, pp. 3729-3734.
- PHUPHUAKRAT ET AL., T., NIPATTUMMAKUL, N., NAMIOKA, T., KERDSUWAN, S. and YOSHIKAWA, K., 2010. Characterization of tar content in the syngas produced in a downdraft type fixed bed gasification system from dried sewage sludge. *Fuel*, 89, pp. 2278-2284.
- SHAO, J.; YAN, R.; CHEN, H.; YANG, H.; LEE, D., 2010. Catalytic effect of metal oxides on pyrolysis of sewage sludge. *Fuel Processing Technology* 91, pp.1113–1118.
- SMITH, K.M.; FOWLER, G.D.; PULLKET, S. AND GRAHAM, N.J.D., 2009. Sewage sludge-based adsorbents: a review of their production, properties and use in water treatment applications. *Water Research* (2009), doi: 10.1016/j.watres.2009.02.038.
- ŠULC, J., ŠTOJDL, J., RICHTER, M., POPELKA, J., SVOBODA, K., SMETANA, J., VACEK, J., SKOBLJA, S. and BURYAN, P., 2012. Biomass waste gasification – Can be the two stage process suitable for tar reduction and power generation?. *Waste Management*, 32(4), pp. 692-700.
- QIN, Y., FENG, J. and LI, W., 2010. Formation of tar and its characterization during air-steam gasification of sawdust in a fluidized bed reactor. *Fuel*, 89, pp. 1344-1344.
- XIE, L., LI, T., GAO, J., FEI, X., WU, X. and JIANG, Y., 2010. Effect of moisture content in sewage sludge on air gasification. *Journal of fuel chemistry technology*, 38(5), pp. 615-620.